

万家寨水利枢纽水压致裂应力测量结果和分析

祁英男 李方全 毛吉震 陈群策 张志国

(国家地震局地壳应力研究所 北京 100085)

摘要 万家寨水利枢纽工程进行了3个钻孔的水压致裂地应力测量。取得了该区最大水平主应力、最小水平主应力量值及最大水平主应力方向。根据测试结果对本区应力状态进行了分析,并对大坝及地下泵站的稳定性进行了讨论。

关键词 水利枢纽, 水压致裂地应力测量, 应力状态, 大坝, 地下泵站

分类号 TU453

1 前言

万家寨水利枢纽是国家重点水利工程山西省引黄入晋工程的重要组成部分。水利枢纽地处山西内蒙交界地带,水利枢纽建成后,每年可向山西省引水 $1.2 \times 10^9 \text{ m}^3$,水利枢纽大坝高为90 m,坝长438 m的混凝土重力坝,水库库容 $896 \times 10^6 \text{ m}^3$,坝后建调峰电站,装机容量 $1.08 \times 10^6 \text{ kW}$,年发电量 $2.75 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。为水利枢纽大坝及输水地下泵站设计提供可靠地应力参数,进行了3个钻孔水压致裂地应力测量。它们分别是水利枢纽中坝线黄河左岸河滩上的万家寨 ZKC1 钻孔(孔口高程901.5 m);黄河左岸青沟内万家寨 ZKC2 钻孔(孔口高程1050.47 m);及黄河右岸串道沟内万家寨 ZKC3 孔(孔口高程1076.28 m)。本文根据地应力测量结果对该区应力状态及大坝、地下泵站的稳定性进行了讨论。

2 应力测量结果

地应力测试在3个钻孔中进行。分别为水利枢纽中坝线黄河左岸河滩上 ZKC1 孔(孔深100 m);黄河左岸青沟内 ZKC2(孔深229.93 m);黄河右岸串道沟 ZKC3 孔(孔深275.0 m)。

ZKC1 孔进行了8个孔段的地应力测试;ZKC2 孔进行了10个孔段的测试;ZKC3 孔进行了8个孔段的测试。每个测试段均得到压力-时间关系记录曲线(图1)。根据记录曲线及计算公式得出了各个孔段的关

闭压力、重张压力、最大水平主应力、最小水平主应力、垂直主应力及最大水平剪切应力(见表1)。采用印模法取得最大水平主应力方向(见表1)。

3 测区地应力场基本特征

3.1 主应力值随深度分布

由3个钻孔得到的最大水平主应力、最小水平主应力及垂直主应力随深度 H 增加,基本上均呈线性增加趋势(图2)。

主应力(MPa)随深度增加的线性回归关系式如下:

ZKC1 孔	$S_h = 0.52 + 0.0588 H$
	$S_H = 0.92 + 0.1110 H$
	$S_V = 0.0265 H$
ZKC2 孔	$S_h = -2.49 + 0.0540 H$
	$S_H = -4.84 + 0.1078 H$
	$S_V = 0.0265 H$
ZKC3 孔	$S_h = 1.95 + 0.0113 H$
	$S_H = 3.86 + 0.0200 H$
	$S_V = 0.0265 H$

由得到的主应力值随深度的变化规律可看到,ZKC1 孔的地应力状态为 $S_H > S_h > S_V$,垂直主应力为最小主应力,就是说水平应力大于垂直应力,ZKC2 钻孔的应力状态与 ZKC1 钻孔基本相似。ZKC3 孔浅部应力状态为 $S_H > S_h > S_V$,垂直主应力为最小主应力;而深部128~194 m应力状态为 S_H

1997年10月17日收到初稿,1997年12月25日收到修改稿。

作者 祁英男 简介:男,60岁,1961年毕业于北京地质学院地球物理勘探系构造专业,现任副研究员,主要从事地应力测量及构造应力场方面的研究工作。

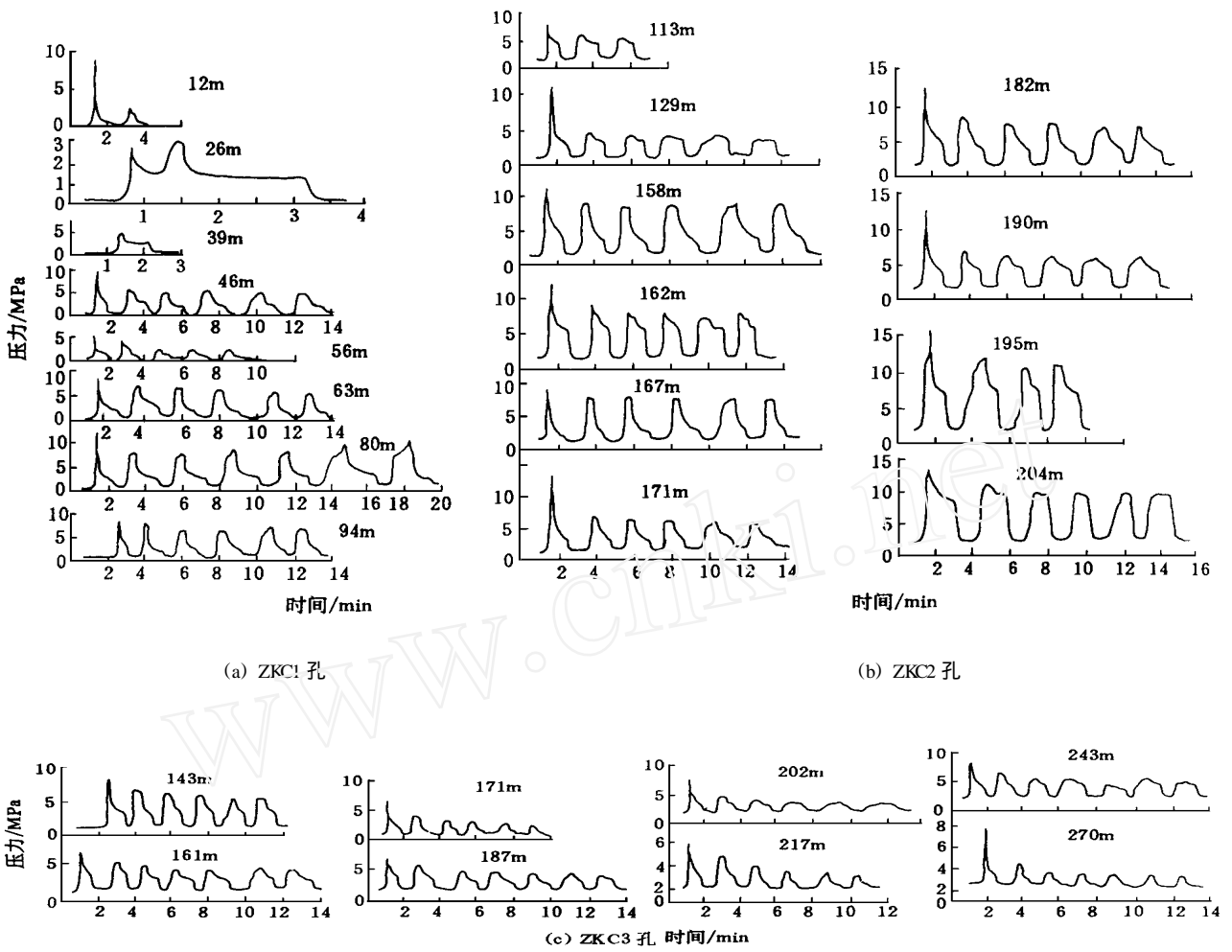


图 1 万家寨水利枢纽地应力测试曲线

Fig. 1 In-situ stress testing curve of Wanjiashai key water control project

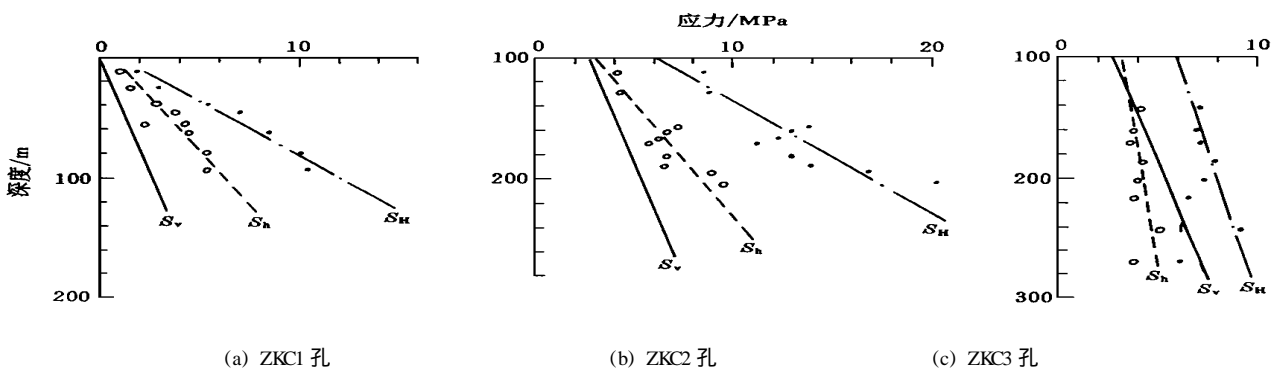


图 2 万家寨水利枢纽主应力值随深度分布

Fig. 2 Variation of principal stress value with depth of Wanjiashai key water control project

$> S_V > S_h$, 垂直主应力为中间主应力。按应力随深度变化趋势, 深度增加到 194 m 以下时, 地应力状态呈现为 $S_V > S_H > S_h$, 即垂直主应力为最大主应力。

此外, 比较3个钻孔的主应力随深度而增加的

梯度可以看到, ZKC3 孔应力随深度增加的梯度比 ZKC1 孔, ZKC2 孔明显减小。从测试结果也可看出, 主应力值的大小, 在黄河的东西两边也有明显的差别。黄河的东西两个地区的应力状态的差异, 可能是受到黄河河谷地形的影响所致。

表 1 山西省万家寨水利枢纽地应力测量结果

Table 1 In-situ stress measurement results of Wanjiashai key water control project, Shanxi

钻孔名称	测量深度	关闭压力	重张压力	最大水平主应力	最小水平主应力	垂直主应力	最大水平剪切应力	最大水平主应力方向
	/m	P_s /MPa	P_r /MPa	S_H /MPa	S_h /MPa	S_v /MPa	τ_{hh} /MPa	
ZKC1	12.	1.02	1.02	1.94	1.02	0.32	0.46	
	26.	1.59	1.52	2.99	1.59	0.69	0.70	
	39.	2.91	2.91	5.43	2.91	1.03	1.26	
	46.	3.84	3.94	7.09	3.84	1.22	1.63	N68.5°W
	56.	2.31	2.18	4.19	2.31	1.48	0.94	N68.5°W
	63.	4.55	4.59	8.43	4.55	1.67	1.94	N77.0°W
	80.	5.49	5.57	10.10	5.49	2.12	2.31	
	94.	5.42	4.90	10.42	5.42	2.49	2.50	N68.5°W
ZKC2	113.	4.07	3.76	8.45	4.07	3.00	2.19	N47.5°E
	129.	4.25	3.92	8.83	4.25	3.42	2.29	N58.0°E
	158.	7.14	7.58	13.36	7.14	4.19	3.26	N65.0°E
	162.	6.60	6.62	12.96	6.60	4.29	3.18	
	167.	6.14	5.92	12.23	6.14	4.43	3.06	N53.0°E
	171.	5.73	5.71	11.17	5.73	4.53	2.72	
	182.	6.70	6.82	12.86	6.70	4.82	3.08	N67.0°E
	190.	6.43	4.90	13.89	6.43	5.04	3.73	N78.0°E
ZKC3	195.	8.92	9.45	16.76	8.92	5.17	3.92	
	204.	9.44	7.65	20.01	9.44	5.41	5.29	
	143.	4.03	4.67	7.19	4.03	3.79	1.58	
	161.	3.67	3.68	6.93	3.67	4.27	1.63	N48.5°E
	171.	3.50	2.97	7.05	3.50	4.53	1.78	
	187.	4.14	3.94	7.81	4.14	4.96	1.84	N63.5°E
	202.	3.83	3.37	7.30	3.83	5.35	1.74	
	217.	3.71	3.61	6.56	3.71	5.75	1.43	N56.6°E
243.	5.01	4.68	9.12	5.01	6.44	2.06	N68.5°E	
270.	3.74	3.69	6.03	3.74	7.16	1.15		

3.2 最大水平剪切应力随深度的变化

由表 1 可见, ZKC1 孔、ZKC3 孔最大水平剪切应力 τ_{hh} 随深度增加变化不大, 前者平均值为 1.47 MPa, 后者为 1.65 MPa。

此外, ZKC2 孔最大水平剪切应力随深度增加有增加的趋势, 其线性回归方程为

$$\tau_{hh} = - 1.13 + 0.0263 H \quad (\text{MPa})$$

3.3 最大水平主应力方向

位于黄河河谷的 ZKC1 孔最大水平主应力方向平均为 N81.4°W, 与黄河河谷走向基本垂直; ZKC2 孔最大水平主应力方向平均为 N61.4°E; 黄河右岸的 ZKC3 孔最大水平主应力方向平均为 N59.1°E。由此可见, 本区除 ZKC1 孔受黄河河谷两侧山地地形影响, 最大水平主应力方向垂直于河谷走向以外, 其他两个钻孔的最大水平主应力方向基本上都为北东向, 平均为 N60.0°E 左右。这一结果与引黄工程其他地区的测量结果相比, 方向偏转不大。同时这一结果与文[4]利用天然地震资料得到的靠近鄂尔多斯的山西北部震源机制解 P 轴方向约为 N54.0°E 的结果基本一致。由此可以认为本次地应力测量得到的

本区地应力场的最大水平主应力方向与区域应力场方向基本吻合。

4 大坝稳定性与实测应力场的关系

本区从地质构造来看, 工程区位于祁吕贺山字型构造马蹄形盾地边缘, 正处于山西台背斜与鄂尔多斯台向斜的过渡地带。全区地层呈平缓单斜构造, 在平缓单斜构造基础上发育程度不同, 规模不大的褶曲及断裂等构造形迹。区内断层不发育, 延伸不长。区内裂隙较发育, 尤以岸边河谷坡地, 由于受后期卸荷影响张开宽度较大。较发育的构造裂隙主要为北北东、北西西向两组, 大裂隙间距一般较大。本区新构造运动表现不明显, 以地壳升降为主。总之本区处于大地构造相对稳定的地块。

由坝区内 ZKC1 钻孔实测地应力资料得到 3 个主应力之间的关系为 $S_H > S_h > S_v$ 。即水平应力大于垂直应力。在这种应力状态下坝区内基岩是否稳定是工程单位所关心的问题。文[5]对数十个不同岩石的原地应力实测数据与各类断层的关系研究后, 认为最大水平剪切应力 τ 与正应力 σ_n 的相关图上其斜率就是库仑摩擦系数, 并指出不同类型断层具有不同的摩擦系数, 这正好反映了不同断层应力状态的不同。杰米森等得出的正断层摩擦系数 $\mu = 0.625$; 逆断层的摩擦系数 $\mu = 0.427$; 走滑断层的摩擦系数 $\mu = 0.220$ 。文[6]指出, 目前在原地应力测量中根据实测应力值是求取 μ 值最好的方法。

由图 3 可见, 由 ZKC1 钻孔的应力测量资料得出

$$\tau = \mu \sigma_n = 0.32 \sigma_n$$

即摩擦系数 $\mu = 0.32$, 与杰米森等得出的逆断层的摩擦系数接近。反映了坝区内断层活动具有逆断层活动性质。由前述实测地应力资料的 3 个主应力的

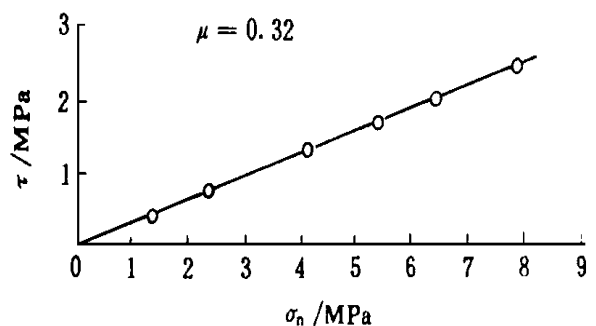


图 3 正应力与剪切应力的关系

Fig. 3 Relation between normal stress and shear stress

关系 $S_H > S_h > S_v$ 来看也是对产生逆断层活动有利。

但是, 本区断裂不发育, 规模不大, 而岩层中裂隙较多。一旦剪切应力增加超过摩擦强度时首先会使原生裂隙产生摩擦活动, 从而会使剪切应力减小^[5], 再者本区岩体抗剪强度较高, 一般均在 10 MPa 左右, 而实测剪切应力却较低(见表 1), 因此可认为在目前应力状态下产生断层活动的可能性不大, 因而坝基岩体是比较稳定的。

5 关于地下泵站长轴轴向的选择

引黄入晋北干线地下泵站设置在 ZKC2 孔附近, 因而讨论地下泵站长轴的取向时主要考虑 ZKC2 孔的实测地应力状态。

地下建筑物如地下洞室、地下电站、地下泵站的长轴取向对于建筑物的稳定性起着很大作用。按一般理论, 对一般高宽比接近于 1 的洞室等地下建筑物来说, 其稳定性取决于垂直于这些建筑物长轴方向的水平应力 (S_H) 与垂直应力 (S_V) 的比值以及它们的绝对值大小。因此, 当应力测量结果为水平应力大于垂直应力时, 地下建筑物长轴轴线方向应选择在最大水平主应力方向上, 因为这时地下建筑物横截面上应力比值 S_H/S_V 最小, 有利于围岩的稳定; 而当应力测量结果为垂直应力大于水平应力时, 地下建筑物长轴轴线方向应选择在最小水平主应力方向上, 因为这时地下建筑物横截面上应力比值 S_H/S_V 仍然是最小, 也有利于围岩的稳定。

根据 ZKC2 孔实测地应力结果可知, 地下泵站位

置上 (195 m) 3 个主应力的比值 $S_V : S_h : S_H = 1 : 1.73 : 3.24$, 可见 3 个主应力值之间差异较大, 水平应力明显大于垂直应力。因而地下泵站长轴方向应该选择在最大水平主应力方向上即 N61.4° 的方向上, 这时地下泵站稳定性最好。或者长轴方向选在与最大水平主应力方向夹角不超过 20° 的方向上即 N41.4° 至 N81.4° 范围内。这是因为地下泵站轴线与最大水平主应力方向夹角在 20° 以内时地下泵站侧壁的压力增加较小, 约增加 12%, 而夹角超过 20° 达到 40° 时侧壁压力将增加 21%。当然还要指出, 地下泵站长轴轴向的选择, 除根据实测地应力条件外, 还要兼顾断裂的产状、宽度和活动情况以及泵站周围岩体水文工程地质条件、施工条件、工程量的大小等作统筹考虑, 这样才能减小地下泵站的变形, 保证地下泵站的稳定。

参 考 文 献

- 1 李方全, 祁英男. 水压致裂应力测量及井温观测. 见: 三峡坝区水库诱发地震研究. 北京: 地震出版社, 1993, 11~49
- 2 李方全. 地应力测量. 岩石力学与工程学报, 1985, 4(1): 95~111
- 3 刘允芳. 水压致裂法地应力测量的校核和修正. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 297~304
- 4 汪素云, 许忠淮. 中国东部大陆的地质构造应力场. 地震学报, 1985, 7(1): 17~31
- 5 Jamison D B, Cook N G W. Note on measured values for the state of stress in the Earth's crust. J. Geophys. Res., 1980, 85(B4): 1833~1838
- 6 Ryuji Ikeda, Hiroaki Tsukahara. Hydrofracturing crustal stress measurements in granitic rocks. In: Proceedings of the 8th Japan Symposium on Rock Mechanics. Tokyo: [s. n.], 1990

THE HYDRO-FRACTURING IN-SITU STRESS MEASUREMENT AND ANALYSIS FOR WANJIAZHAI KEY WATER CONTROL PROJECT

Qi Yingnan Li Fangquan Mao Jizhen Chen Qunce Zhang Zhiguo

(Institute of Crustal Dynamics, State Seismological Bureau, Beijing 100085)

Abstract Hydro-fracturing in-situ stress measurements of three boreholes in Wanjiazhai key water control project have been carried out. The Maximum and the minimum horizontal stresses and the direction of the maximum horizontal stress are obtained. According to the test results, the stress state of this area is analyzed. The stability of the dam and the underground pump station are discussed also.

Key words key water control project, hydro-fracturing stress measurement, stress state, dam, underground pump station